

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6976228号
(P6976228)

(45) 発行日 令和3年12月8日 (2021. 12. 8)

(24) 登録日 令和3年11月11日 (2021. 11. 11)

(51) Int. Cl.	F I
H O 1 L 21/3065 (2006.01)	H O 1 L 21/302 I O 1 D
H O 5 H 1/46 (2006.01)	H O 1 L 21/302 I O 5 A
	H O 5 H 1/46 C
	H O 5 H 1/46 R

請求項の数 4 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2018-137722 (P2018-137722)	(73) 特許権者	501387839
(22) 出願日	平成30年7月23日 (2018. 7. 23)		株式会社日立ハイテク
(65) 公開番号	特開2020-17565 (P2020-17565A)		東京都港区虎ノ門一丁目17番1号
(43) 公開日	令和2年1月30日 (2020. 1. 30)	(74) 代理人	110002066
審査請求日	令和2年6月19日 (2020. 6. 19)		特許業務法人筒井国際特許事務所
		(72) 発明者	薬師寺 守
			東京都港区西新橋一丁目24番14号 株
			式会社日立ハイテクノロジーズ内
		(72) 発明者	大越 康雄
			東京都港区西新橋一丁目24番14号 株
			式会社日立ハイテクノロジーズ内
		(72) 発明者	桑原 謙一
			東京都港区西新橋一丁目24番14号 株
			式会社日立ハイテクノロジーズ内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 プラズマ処理装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

試料がプラズマ処理される処理室と、プラズマを生成するための第1高周波電力を供給する第1高周波電源と、試料が載置される試料台と、前記試料台に第2高周波電力を供給する第2高周波電源とを備えるプラズマ処理装置において、

前記第1高周波電力をパルス変調するための第1パルスと前記第2高周波電力をパルス変調するための第2パルスを生成するパルス生成ユニットをさらに備え、

前記第1パルスは、オフ期間と第1期間と第2期間とを有し、

前記第1期間は、第1振幅の期間である第1振幅期間と第2振幅の期間である第2振幅期間とを有し、

前記第1振幅は、前記第2振幅より小さく、

前記第2期間の振幅は、前記第1期間の振幅より大きく、

前記第2パルスは、前記第2期間の間、オン期間となることを特徴とするプラズマ処理装置。

【請求項 2】

試料がプラズマ処理される処理室と、プラズマを生成するための第1高周波電力を供給する第1高周波電源と、試料が載置される試料台と、前記試料台に第2高周波電力を供給する第2高周波電源とを備えるプラズマ処理装置において、

前記第1高周波電力をパルス変調するための第1パルスと前記第2高周波電力をパルス変調するための第2パルスを生成するパルス生成ユニットをさらに備え、

10

20

前記第 1 パルスは、オフ期間と第 1 期間と第 2 期間とを有し、
前記第 1 期間は、第 1 振幅の期間である第 1 振幅期間と第 2 振幅の期間である第 2 振幅
期間とを有し、
前記第 1 振幅は、前記第 2 振幅より大きく、
前記第 2 期間の振幅は、前記第 1 期間の振幅より大きく、
前記第 2 パルスは、前記第 2 期間の間、オン期間となることを特徴とするプラズマ処理
装置。

【請求項 3】

試料がプラズマ処理される処理室と、プラズマを生成するための第 1 高周波電力を供給
する第 1 高周波電源と、試料が載置される試料台と、前記試料台に第 2 高周波電力を供給
する第 2 高周波電源とを備えるプラズマ処理装置において、

前記第 1 高周波電力をパルス変調するための第 1 パルスと前記第 2 高周波電力をパルス
変調するための第 2 パルスを生成するパルス生成ユニットをさらに備え、

前記第 1 パルスは、所定の期間とオフ期間と第 1 期間と第 2 期間とを有し、
前記所定の期間は、前記第 1 パルスのオフ期間より前の期間であり、
前記第 1 期間は、前記第 1 パルスのオフ期間より後の期間であり、
前記所定の期間の振幅値および前記第 1 期間の振幅値は、有限の値であり、
前記第 2 期間の振幅は、前記所定の期間の振幅および前記第 1 期間の振幅より大きく、
前記第 2 パルスは、前記第 2 期間の間、オン期間となることを特徴とするプラズマ処理
装置。

【請求項 4】

請求項 1 ないし請求項 3 のいずれか一項に記載のプラズマ処理装置において、
前記パルス変調された第 1 高周波電力をモニタする検波器をさらに備え、
前記検波器は、複数の検波器であることを特徴とするプラズマ処理装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、プラズマ処理装置の技術に関する。また、本発明は、特に、半導体素子等の試料をプラズマ処理するためにプラズマを用いて高精度なエッチング処理を施すのに好適なプラズマ処理装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、試料である半導体素子の表面を処理する装置および方法として、半導体素子をプラズマでエッチングする装置および方法が知られている。ここでは、特に、公知の電子サイクロトロン共鳴 (Electron Cyclotron Resonance: ECR) 方式のプラズマエッチング装置を例に、従来技術を説明する。この ECR 方式では、外部より磁場を印加した真空容器中でマイクロ波によってプラズマを発生する。磁場によって電子はサイクロトロン運動を行い、この磁場の周波数とマイクロ波の周波数とを共鳴させることで、効率よくプラズマを生成できる。

【0003】

この方式では、半導体素子に入射するイオンを加速するために、試料に対し、高周波電力を、概略正弦波での連続波形で印加している。ここで、試料に印加する高周波電力を、高周波バイアスと称する。また、試料については、一例としてウエハである場合を説明する。また、プラズマとなるガスには、塩素やフッ素等のハロゲンガスが広く使われている。プラズマにより発生したラジカルやイオンと、試料の被エッチング材とが反応することで、エッチングが進行する。エッチングを高精度に制御するためには、プラズマ制御によるラジカル種の選定やイオン量の制御を行う必要がある。

【0004】

ラジカルやイオンの制御方法としては、プラズマをパルス変調として時間変調したパルス (パルスプラズマと呼ばれる) を用いる方式であるパルスプラズマ方式がある。このパ

10

20

30

40

50

ルスプラズマ方式は、プラズマのオンとオフを繰り返すことで解離を制御し、ラジカルの解離状態やイオン密度を制御するものである。この方式では、パルス変調されたプラズマ（パルスプラズマ）に関するパルス周波数、デューティー比、およびオン時間とオフ時間の比を、制御パラメータとする。パルス周波数は、パルスプラズマのオンとオフの繰り返し周波数である。デューティー比は、パルスプラズマのオンとオフの繰り返しの一周期に対するオン時間の比である。これらの制御パラメータにより、エッチングの高精度制御が可能になる。

【 0 0 0 5 】

先行技術例として、特開平 2 - 1 0 5 4 1 3 号公報（特許文献 1）、特開 2 0 1 5 - 1 1 5 5 6 4 号公報（特許文献 2）が挙げられる。特許文献 1 には、時間変調されたマイクロ波に対し、同一の位相を持って同期させた高周波バイアスを印加する手法が開示されている。特許文献 2 には、時間変調されたマイクロ波に対し位相を変調させた高周波バイアスを印加する手法が開示されている。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 6 】

【特許文献 1】特開平 2 - 1 0 5 4 1 3 号公報

【特許文献 2】特開 2 0 1 5 - 1 1 5 5 6 4 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

20

【 0 0 0 7 】

従来技術例のプラズマ処理装置のように、時間変調されたマイクロ波に対し、同一の位相を持って同期させた高周波バイアスを印加する場合、マイクロ波のオン直後、いわゆるプラズマ生成直後のプラズマが不安定な期間において、高周波バイアスがオンされる。プラズマが不安定な期間は、真空容器中のプラズマ分布に偏りが生じ、同様にプラズマ中に存在するイオン分布にも偏りが生ずる。この際、高周波バイアスをオンすることで、イオンをウエハ上に引き込んでエッチングを進行させる。しかし、イオン分布に偏りがある場合、イオン分布が偏った状態でウエハ上に引き込まれる。そのため、エッチング速度分布に偏りが生じ、デバイス特性が著しく劣化する。

【 0 0 0 8 】

30

このエッチング速度分布の偏りを避ける方法として、時間変調されたマイクロ波に対し位相を変調させた高周波バイアスをオンする方法がある。この方法では、マイクロ波オン直後のプラズマが不安定な期間を避けるため、マイクロ波に対して高周波バイアスの位相を変調し、マイクロ波のオンよりも遅らせて高周波バイアスをオンする。これにより、真空容器中のプラズマ分布が均一になる期間、すなわちイオン分布が均一となる期間に、高周波バイアスをオンする。高周波バイアスのオンにより、イオンをウエハ上に引き込んでエッチングを進行させる。これにより、イオン分布が均一な状態でウエハ上に引き込まれるため、エッチング速度分布が均一となり、良好なデバイス特性が得られる。

【 0 0 0 9 】

しかし、この方法では、マイクロ波オン、かつ高周波バイアスオフの期間が生ずる。この期間のマイクロ波の出力値は、高周波バイアスオン期間でのマイクロ波の出力値と同じである。そのため、エッチングの反応は、ラジカルエッチングが主体となり、ウエハ上の回路パターン（被エッチング材）に対して全方向にエッチングが進行する、いわゆる等方性エッチングが進む。等方性エッチングにより、回路パターンは横方向にエッチングされ、これによって、クリティカル・ディメンション（Critical Dimension: CD）に差異が生じ、デバイス特性が著しく劣化する。CD は、回路パターン上部から底部にかけてのパターン寸法計測値である。

40

【 0 0 1 0 】

本発明の目的は、プラズマ処理装置の技術に関して、特に、プラズマ生成用高周波電力および高周波バイアス電力を時間変調する方式のプラズマ処理装置に関して、高精度にブ

50

ロセスを制御することができる技術を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明のうち代表的な実施の形態は、プラズマ処理装置であって、以下に示す構成を有することを特徴とする。一実施の形態のプラズマ処理装置は、試料がプラズマ処理される処理室と、プラズマを生成するための第1高周波電力を供給する第1高周波電源と、試料が載置される試料台と、前記試料台に第2高周波電力を供給する第2高周波電源とを備えるプラズマ処理装置において、前記第1高周波電力を時間変調するための第1パルスと前記第2高周波電力を時間変調するための第2パルスを生成するパルス生成ユニットをさらに備え、前記第1パルスは、オフ期間と第1期間と第2期間とを有し、前記第1期間の振幅値は、有限の値であり、前記第2期間の振幅は、前記第1期間の振幅より大きく、前記第2パルスは、前記第2期間の間、オン期間となる。

10

【発明の効果】

【0012】

本発明のうち代表的な実施の形態によれば、プラズマ処理装置の技術に関して、特に、プラズマ生成用の高周波電力および高周波バイアス電力を時間変調する方式のプラズマ処理装置に関して、高精度にプロセスを制御することができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】本発明の一実施の形態のプラズマ処理装置である、マイクロ波ECRプラズマエッチング装置の縦断面の概略構成を示す図である。

20

【図2】実施の形態で、電磁波発生と高周波電力供給を行う場合の制御部およびパルス生成ユニット等の構成について示す図である。

【図3】実施の形態で、整合器の構成について示す図である。

【図4】実施の形態で、パルス出力制御の第1ケースにおける、マイクロ波出力、高周波バイアス出力、およびプラズマ密度のタイミングチャートを示す図である。

【図5】実施の形態で、パルス出力制御の第2ケースにおける、マイクロ波出力、および高周波バイアス出力のタイミングチャートを示す図である。

【図6】実施の形態で、パルス出力制御の第3ケースにおける、マイクロ波出力、および高周波バイアス出力のタイミングチャートを示す図である。

30

【図7】実施の形態で、第4ケースとして、マイクロ波出力、および高周波バイアス出力のタイミングチャートを示す図である。

【図8】比較例のプラズマ処理装置における、第5ケースとして、マイクロ波出力、および高周波バイアス出力のタイミングチャートを示す図である。

【図9】比較例のプラズマ処理装置における、第6ケースとして、マイクロ波出力、および高周波バイアス出力のタイミングチャートを示す図である。

【図10】実施の形態および比較例の各ケースにおける測定結果のエッチング特性について示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

40

図1～図10を用いて、本発明の一実施の形態のプラズマ処理装置について詳細に説明する。

【0015】

〔プラズマ処理装置〕

図1は、本発明の実施の形態のプラズマ処理装置1として、特にECR方式のマイクロ波プラズマエッチング装置の縦断面の概略構成を示す。なお、説明上、縦および軸に対応する鉛直方向をZ方向として示す。水平方向や半径方向を構成する2つの方向をX方向およびY方向として示す。プラズマ処理装置1における、処理室、試料台、試料等の各部は、概略的に円筒や円柱や円板等の軸対称形状を有する。その軸方向（一点鎖線で示す）がZ方向に相当し、半径方向がX方向またはY方向に相当する。本実施の形態のプラズマ処

50

理装置 1 は、軸対称形状の空間や試料におけるプラズマ等の分布やエッチング速度等の分布を制御する。

【 0 0 1 6 】

図 1 で、プラズマ処理装置 1 は、制御部 1 2 0、真空容器 1 0 1、処理室 1 0 4、シャワープレート 1 0 2、誘電体窓 1 0 3、ガス供給装置 1 0 5、真空排気装置 1 0 6、試料台である試料載置用電極 1 1 1、導波管 1 0 7、電磁波発生用電源 1 0 9、パルス生成ユニット 1 2 1、磁場生成コイル 1 1 0、高周波バイアス電源 1 1 4、直流電源 1 1 6、等を備える。

【 0 0 1 7 】

真空容器 1 0 1 は、上部の一部が開放されて、導波管 1 0 7 と接続されている。真空容器 1 0 1 の上部には、シャワープレート 1 0 2 と誘電体窓 1 0 3 とが設置されて、密封されている。これにより、真空容器 1 0 1 内に、プラズマ処理室である処理室 1 0 4 が形成されている。シャワープレート 1 0 2 は、真空容器 1 0 1 内すなわち処理室 1 0 4 内に、エッチングガスを導入するための複数の孔が設けられた、例えば石英製のプレートである。シャワープレート 1 0 2 には、ガス管を通じて、エッチングガスを流すためのガス供給装置 1 0 5 が接続されている。

【 0 0 1 8 】

また、真空容器 1 0 1 の底面には、排気用開閉バルブ 1 1 7 および排気速度可変バルブ 1 1 8 を介して、真空排気装置 1 0 6 が接続されている。処理室 1 0 4 内部は、プラズマ処理装置 1 が排気用開閉バルブ 1 1 7 を開として真空排気装置 1 0 6 を駆動することで減圧され、真空状態となる。処理室 1 0 4 内の圧力は、排気速度可変バルブ 1 1 8 によって所望の圧力に調整される。エッチングガスは、ガス供給装置 1 0 5 からシャワープレート 1 0 2 を介して処理室 1 0 4 内に導入され、排気速度可変バルブ 1 1 8 を介して真空排気装置 1 0 6 によって排気される。

【 0 0 1 9 】

また、Z 方向の軸上で、シャワープレート 1 0 2 に対向して、真空容器 1 0 1 内の下部には、試料台である試料載置用電極 1 1 1 が設けられている。試料載置用電極 1 1 1 上には、試料であるウエハ 1 1 2 が配置される。ウエハ 1 1 2 は円板状である。ウエハ 1 1 2 の上面の被エッチング材に対してエッチングが行われることで、半導体素子のための回路パターンが形成される。

【 0 0 2 0 】

プラズマを生成するための高周波電力を処理室 1 0 4 に供給するために、誘電体窓 1 0 3 の上方には、Z 方向の軸に沿って、電磁波を伝送する導波管 1 0 7 が設けられている。導波管 1 0 7 は、Z 方向に延在して真空容器 1 0 1 の開口部に連通する導波管部と、コーナー部を通じて曲がって水平方向（例えば X 方向）に延在する導波管部とを有する。

【 0 0 2 1 】

また、真空容器 1 0 1 内で誘電体窓 1 0 3 の上方には、導波路の一部として円柱状の空間部が形成されている。導波管 1 0 7 を伝送された電磁波は、この空間部でも伝送されて、誘電体窓 1 0 3 を透過して、処理室 1 0 4 内に供給される。

【 0 0 2 2 】

導波管 1 0 7 へ伝送される電磁波は、電磁波発生用電源 1 0 9 から整合器 1 1 9 を介して発振させられる。電磁波発生用電源 1 0 9 は、第 1 高周波電源であり、プラズマを生成するための電磁波（第 1 高周波電力 1 6 1）、特にマイクロ波を発生して、導波管 1 0 7 へ供給する。電磁波発生用電源 1 0 9 は、パルス生成ユニット 1 2 1 からの第 1 パルス 1 5 1 に基づいて、パルス変調されたマイクロ波（第 1 高周波電力 1 6 1）を出力する。

【 0 0 2 3 】

電磁波発生用電源 1 0 9 および高周波バイアス電源 1 1 4 には、電氣的接続回路を通じてパルス発生ユニット 1 2 1 が接続されている。パルス発生ユニット 1 2 1 により、電磁波発生用電源 1 0 9 からのマイクロ波を、図 2 に示すように任意に設定可能な繰り返し周波数でパルス変調（特に時間変調）することができる。パルス発生ユニット 1 2 1 は、電

10

20

30

40

50

磁波発生用電源 109 の出力（第 1 高周波電力 161）をパルス変調された出力とするための第 1 パルス 151（図 2 での位相調整後電磁波変調用パルス信号 P3）を生成し、電磁波発生用電源 109 に供給する。これにより、電磁波発生用電源 109 から、出力の電磁波（第 1 高周波電力 161）として、パルス変調されたマイクロ波が発生される。

【0024】

なお、本実施の形態の効果は、第 1 高周波電力 161 として使用する電磁波の周波数によって特に限定されるものではない。本実施の形態のプラズマ処理装置 1 では、電磁波発生用電源 109 からの電磁波の周波数として 2.45 GHz としたマイクロ波を使用する。

【0025】

処理室 104 の外部、真空容器 101 の外側には、磁場を生成する磁場生成コイル 110 が設けられている。真空容器 101 の上部の側壁の外側、および上面の上側に、磁場生成コイル 110 が配置されている。電磁波発生用電源 109 から発振された電磁波は、磁場生成コイル 110 により生成された磁場との相互作用によって、ECR を生起し、処理室 104 内に高密度プラズマを生成する。また、高周波バイアス電源 114 からは試料載置用電極 111 へ高周波バイアスが供給される。これらにより、試料台である試料載置用電極 111 上に配置されたウエハ 112 にエッチング処理が施される。

【0026】

シャワープレート 102、試料載置用電極 111、磁場生成コイル 110、排気用開閉バルブ 117、排気速度可変バルブ 118、およびウエハ 112 等の各部は、処理室 104 の中心軸（一点鎖線）に対し同軸上に配置されている。そのため、エッチングガスの流れや、プラズマにより生成されたラジカルおよびイオン、更にはエッチングにより生成された反応生成物は、ウエハ 112 に対し同軸の方向（Z 方向）に導入されて排気される。この同軸および軸対称形状の配置は、エッチングレート、エッチング形状のウエハ面内均一性を、軸対称の分布に近付けて、ウエハ処理の均一性を向上させる効果がある。

【0027】

試料載置用電極 111 は、その電極表面が、図示しない溶射膜で被覆されており、高周波フィルタ 115 を介して直流電源 116 と接続されている。さらに、試料載置用電極 111 には、マッチング回路 113 を介して高周波バイアス電源 114 が接続されている。

【0028】

高周波バイアス電源 114 は、第 2 高周波電源であり、高周波バイアスである第 2 高周波電力 162 を発生し、試料載置用電極 111 へ供給する。高周波バイアス電源 114 は、パルス発生ユニット 121 からの第 2 パルス 152 に基づいて、パルス変調された第 2 高周波電力 162 を発生する。パルス発生ユニット 121 は、第 2 高周波電力 162 をパルス変調（特に時間変調）された出力とするための第 2 パルス 152（図 2 での位相調整後高周波バイアス変調用パルス信号 P4）を生成し、高周波バイアス電源 114 へ供給する。制御部 120 からの制御に基づいて、高周波バイアス電源 114 からは、時間変調された第 2 高周波電力 162 を、試料載置用電極 111 に選択的に供給することができる。

【0029】

なお、本実施の形態の効果は、高周波バイアス電源 114 の高周波バイアスの周波数によって特に限定されない。本実施の形態のプラズマ処理装置 1 は、その周波数として 400 kHz とした高周波バイアスを使用する。

【0030】

制御部 120 は、上述の ECR 方式のマイクロ波プラズマエッチング装置であるプラズマ処理装置 1 を制御する。制御部 120 は、計算機または IC 基板等で構成される。制御部 120 は、パルス生成ユニット 121、電磁波発生用電源 109、ガス供給装置 105、排気速度可変バルブ 118、直流電源 116、高周波バイアス電源 114 等の各部と電氣的に接続されている。制御部 120 は、パルス発生ユニット 121 等の動作を制御する。制御部 120 は、図示しない入力手段による入力に基づいて、電磁波発生用電源 109、高周波バイアス電源 114、およびパルス発生ユニット 121 のパルスのオン・オフの

10

20

30

40

50

タイミングを含む繰り返し周波数やデューティ比等の制御パラメータを制御する。また、制御部 120 は、図示しない入力手段による入力に基づいて、エッチングを実施するためのガス流量、処理圧力、電磁波電力、高周波バイアス電力、コイル電流、パルスのオン時間およびオフ時間等の、エッチングパラメータを制御する。

【0031】

なお、デューティ比とは、パルスの一周期に対するオン期間の割合のことである。本実施の形態の例では、パルスの繰り返し周波数は、5 Hz ~ 10 kHz までの範囲で変更でき、デューティ比は、1 % ~ 90 % までの範囲で変更できる。また、時間変調の設定は、オン時間でもオフ時間でも可能である。

【0032】

パルス発生ユニット 121 は、制御部 120 からの制御に基づいて、第 1 高周波電力 161 を時間変調するための第 1 パルス 151 を電磁波発生用電源 109 に送信するとともに、第 2 高周波電力 162 を時間変調するための第 2 パルス 152 を高周波バイアス電源 114 に送信する。

【0033】

[制御部およびパルス生成ユニット]

図 2 を用いて、電磁波発生用電源 109 から時間変調された電磁波（第 1 高周波電力 161）を発生する場合と、高周波バイアス電源 114 から時間変調された高周波バイアス（第 2 高周波電力 162）を試料載置用電極 111 に供給する場合とについて説明する。

【0034】

図 2 は、上記電磁波発生および高周波バイアス供給を行う場合の制御部 120 およびパルス生成ユニット 121 等の構成を示す。制御部 120 は、電磁波発生用電源 109 および高周波バイアス電源 114 をそれぞれパルス変調するための時間情報（言い換えると制御信号）C1 を、パルス発生ユニット 121 に送信する。この時間情報（制御信号）C1 は、繰り返し周波数、デューティ比、電磁波発生用電源 109 のオンのタイミングと高周波バイアス電源 114 のオンのタイミング、電磁波発生用電源出力値、および高周波バイアス電源出力値、を合わせた時間情報である。

【0035】

制御部 120 からパルス発生ユニット 121 へは、時間情報 C1 として、電磁波発生用電源 109 のパルス変調用波形である第 1 パルス 151 と高周波バイアス電源 114 のパルス変調用波形である第 2 パルス 152 とを同期させるか、非同期させるかを選択する情報も送信される。また、制御部 120 からパルス発生ユニット 121 へは、時間情報 C1 として、電磁波発生用電源 109 の出力における後述のパルスオン期間の二値以上の出力値とそれに係わる時間情報も送信される。

【0036】

パルス発生ユニット 121 から電磁波発生用電源 109 および高周波バイアス電源 114 へは、それぞれ、制御されたタイミングで、パルス出力制御のための時間情報が送信される。すなわち、パルス発生ユニット 121 から電磁波発生用電源 109 へは第 1 パルス 151 として位相調整後電磁波変調用パルス信号 P3 が供給される。パルス発生ユニット 121 から高周波バイアス電源 114 へは第 2 パルス 152 として位相変調後高周波バイアス変調用パルス信号 P4 が供給される。電磁波発生用電源 109 は、パルス発生ユニット 121 からの第 1 パルス 151（位相調整後電磁波変調用パルス信号 P3）に基づいて、時間変調された電磁波を第 1 高周波電力 161 として発生させる。高周波バイアス電源 114 は、パルス発生ユニット 121 からの第 2 パルス 152（位相変調後高周波バイアス変調用パルス信号 P4）に基づいて、時間変調された高周波バイアス電力を第 2 高周波電力 162 として発生させる。

【0037】

パルス発生ユニット 121 は、回路として、パルス生成部 201、位相制御部 202 を含む。パルス生成部 201 は、基準となるパルスとして、電磁波変調用パルス信号 P1 および高周波バイアス変調用パルス信号 P2 を生成し出力する。位相制御部 202 は、入力

10

20

30

40

50

されたパルスの位相を制御して、位相調整されたパルスを入力する。パルス生成部 201 からの電磁波変調用パルス信号 P1 は、位相制御部 202 で位相調整され、出力である位相調整後電磁波変調用パルス信号 P3 が、第 1 パルス 151 として電磁波発生用電源 109 へ供給される。

【0038】

本実施の形態のプラズマ処理装置 1 は、制御部 120 からパルス発生ユニット 121、およびパルス発生ユニット 121 から電磁波発生用電源 109 への回路において、第 1 高周波電力 161 のパルス変調の制御のための信号として、以下のような信号を送信する。すなわち、プラズマ発生ユニット 121 は、パルス生成部 201 および位相制御部 202 を介して、電磁波変調用パルス信号 P1 および位相調整後電磁波変調用パルス信号 P3 として、パルスオン期間に、二値あるいは三値の電磁波発生用電源出力値と時間情報を連続して送信する。電磁波発生用電源出力値は、電磁波発生用電源 109 の出力の第 1 高周波電力 161 (マイクロ波) におけるパルスオン期間での出力値を指す。

【0039】

例えば、電磁波変調用パルス信号 P1 は、パルス生成部 201 からの出力の 3 本のラインで示す、三値の電磁波発生用電源出力値として、出力値 a1、出力値 a2、出力値 a3 を有する。同様に、位相調整後電磁波変調用パルス信号 P3 は、位相調整部 202 からの出力の 3 本のラインで示す、三値の電磁波発生用電源出力値として、出力値 a1、出力値 a2、出力値 a3 を有する。それぞれの出力値には時間情報を伴う。なお、図 2 の構成例では、電磁波変調用パルス信号 P1 および位相調整後電磁波変調用パルス信号 P3 は、三値 (a1, a2, a3) に対応可能な形態とする場合の 3 本のラインとして示している。二値 (a1, a2) のみに対応可能な形態としてもよいし、三値のうち二値を選択して使用可能な形態としてもよい。

【0040】

これにより、プラズマ処理装置 1 は、電磁波発生用電源 109 から、第 1 高周波電力 161 として、時間変調され、かつ、パルスオン期間に二値あるいは三値の出力値を持つ電磁波であるマイクロ波を連続して発生させる。例えば、後述の図 4 の第 1 ケースのマイクロ波出力 401 における第 1 出力 411 および第 2 出力 412 は、パルスオン期間の二値の出力値 (a1, a2) と対応している。

【0041】

また、パルス発生ユニット 121 は、パルス生成部 201 から出力された高周波バイアス変調用パルス信号 P2 を、位相制御部 202 で位相調整し、出力である位相調整後高周波バイアス変調用パルス信号 P4 を、第 2 パルス 152 として高周波バイアス電源 114 へ供給する。高周波バイアスは、パルスオン期間で 1 つの出力値を有する。図 2 では、高周波バイアス変調用パルス信号 P2 および位相調整後高周波バイアス変調用パルス信号 P4 を 1 本のライン (点線) で示している。

【0042】

[整合器]

図 3 を用いて、電磁波発生用電源 109 より発振された電磁波 (第 1 高周波電力 161) を整合する整合器 119 について説明する。図 3 は、実施の形態での整合器 119 の構成例を示す。電磁波発生用電源 109 より発振された電磁波 311 は、第 1 高周波電力 161 およびマイクロ波に対応する。電磁波 311 は、前述のように、時間変調された、パルスオン期間で二値 (a1, a2) あるいは三値 (a1, a2, a3) の出力値を持つ。本例では、電磁波 311 を、三値 (a1, a2, a3) に対応可能な形態における 3 本のラインで示している。

【0043】

電磁波 311 は、整合器 119 を介して、調整後電磁波 312 として、導波管 107 へ伝送される。整合器 119 では、電磁波 311 を、調整器 301 に入力して調整し、調整後電磁波 312 を導波管 107 へ供給する。プラズマ処理装置 1 の整合器 119 は、第 1 高周波電力 161 (電磁波 311) の出力値におけるパルスオン期間での二値以上の出力

値をモニタするために、少なくとも2つの検波器を有する。図3の構成例では、三値に対応可能な形態として、3つの検波器として、検波器(第1検波器)302、検波器(第2検波器)303、および検波器(第3検波器)304が設けられている。電磁波311の出力値における二値あるいは三値の調整を、パルスオン期間に連続して行う場合、その電磁波311の出力値の数に応じた数の検波器を設けることが望ましい。このような整合器119の構成によって、遅延なく連続的に調整が可能となる。

【0044】

電磁波311の出力値が二値である形態の場合には、それに応じた2個の検波器302、303が設けられる。電磁波311の出力値が三値である形態の場合には、それに応じた3個の検波器302、303、304が設けられる。なお、プラズマ処理装置1は、図2および図3のような三値の出力値に対応可能な回路の構成において、後述の出力制御のパターンに応じて、二値の出力値とするように制御することも可能である。

10

【0045】

図3の構成例では、調整器301の出力における三値に対応する3本の電氣的接続回路のラインには、分岐する形で、検波器302、303、304が接続されている。調整器301での調整は、検波器302、303、304によって電磁波を逐次モニタすることで実施される。例えば、調整器301の出力の第1ラインには、分岐して検波器302が接続されており、検波器302の出力のラインが、モニタ値313として、調整器301に入力される。他の検波器303、304についても同様である。調整器301から導波管107への出力の調整後電磁波312における三値の出力値を(b1, b2, b3)で示す。

20

【0046】

[パルス出力制御]

次に、実施の形態のプラズマ処理装置1における詳細構成例として、各種のパルス出力制御の例について説明する。本発明者は、エッチング速度分布の偏りとCDの差異とを同時に避ける方法として、マイクロ波オン期間でマイクロ波出力値を二値以上設定する方法、および対応するプラズマ処理装置1のパルス生成ユニット121等の構成を工夫した。プラズマ処理装置1は、制御部120からパルス生成ユニット121を時間情報C1(図2)によって制御することで、以下の各種のパルス出力制御を実現できる。以下では、制御部120およびパルス発生ユニット121を通じた、各パルス出力制御の例を、各ケース(第1ケース~第4ケースとする)として説明する。

30

【0047】

[第1ケース]

図4は、パルス出力制御に関する第1ケースにおける、パルス変調されたマイクロ波出力401、パルス変調された高周波バイアス出力402、およびプラズマ密度403における時間的な関係を表すタイミングチャートを示す。マイクロ波出力401は、第1パルスと対応し、電磁波発生用電源109からの電磁波としてマイクロ波(第1高周波電力161)の出力に対応する。高周波バイアス出力402は、第2パルスと対応し、高周波バイアス電源114からの高周波バイアス(第2高周波電力162)の出力に対応する。プラズマ密度403は、マイクロ波出力401および高周波バイアス出力402の両方による制御が行われた場合に、処理室104内でウエハ112上方に形成されるプラズマの密度に対応する。

40

【0048】

マイクロ波出力401は、図示の通り、周期(周期時間450)毎に、オフ期間430、第1期間431、および第2期間432を有し、第1期間431の第1出力411と第2期間432の第2出力412とで連続して二値の出力値が出力される。オフ期間430は例えば時刻t0から時刻t1までの期間である。第1出力411は、例えば時刻t1から時刻t2までの第1期間431でオン状態である第1出力値を示す。第2出力412は、例えば時刻t2から時刻t3までの第2期間432でオン状態である第2出力値を示す。第1出力411および第2出力412は、図2および図3での二値(a1, a2)や二

50

値 (b1, b2) と対応している。また、マイクロ波出力 401 における一周期 (周期時間 450) のうち、パルスオン期間 441、およびパルスオフ期間 440 を示す。パルスオン期間 441 は、上記第 1 期間 431 と第 2 期間 432 とで構成されている。パルスオフ期間 440 はオフ期間 430 と対応している。

【0049】

この際、プラズマ処理装置 1 の特に制御部 120 は、マイクロ波出力 401 の第 2 出力 412 (第 2 期間 432) と同期させるように、パルス生成ユニット 121 で位相を変調させることで、高周波バイアス出力 402 をオンする。これにより、高周波バイアス出力 402 のパルスオン期間 461 での第 1 出力 421 となる。パルスオン期間 461 は、上記第 2 期間 432 と同じく例えば時刻 t2 から時刻 t3 までの期間である。パルスオン期間 461 の前には、パルスオフ期間 460 を有する。パルスオフ期間 460 は、上記第 1 期間 431 と対応した例えば時刻 t1 から時刻 t2 までの期間 (オフ期間 470) を含む。

【0050】

マイクロ波出力 401 の第 1 期間 431 の第 1 出力 411 の出力値は、0 よりも大きく、かつ、第 2 期間 432 の第 2 出力 412 の出力値よりも小さい値として設定されている。また、マイクロ波出力 401 の第 1 出力 411 の出力値は、対応する高周波バイアス出力 402 のパルスオフ期間 460 (特にオフ期間 470) での等方性エッチングを極力抑制する最低の値であることが望ましい。さらに、その出力値は、マイクロ波出力 401 の第 1 出力 411 から第 2 出力 412 への移行 (例えば時刻 t2)、プラズマオフからプラズマオン、または、プラズマオンのままステップを切り替えた場合に、プラズマ密度が不安定にならず、プラズマが着火あるいは継続する最低の値であることが望ましい。すなわち、マイクロ波出力 401 の第 1 出力 411 の目的は、等方性エッチングを極力抑制しつつ、かつ、高周波バイアス出力 402 のパルスオン期間 461 のプラズマ密度の安定化にある。

【0051】

本発明者は、パルスオン期間中のプラズマ密度分布の挙動を確認するため、プラズマ密度の時間分解測定をラングミュアプローブ測定法により行った。プラズマ密度 403 は、図示の通り、マイクロ波出力 401 の第 1 出力 411 の第 1 期間 431 (対応する高周波バイアス出力 402 のパルスオフ期間 460、特にオフ期間 470) で、ある程度安定してから、第 2 出力 412 の第 2 期間 432 へ移行するため、直ちに安定する。図示のように、第 2 期間 432 (対応する高周波バイアス出力 402 のパルスオン期間 461)、例えば時刻 t2 から時刻 t3 までの期間では、プラズマ密度が安定している。本実施の形態では、このプラズマ密度が安定した期間に、高周波バイアス出力 402 がオンされている。すなわち、パルスオン期間 461 で第 1 出力 421 とされている。これにより、プラズマ中のイオン分布が均一な状態でウエハ 112 上に引き込まれ、エッチング速度分布が均一となる。さらに、マイクロ波出力 401 の第 1 出力 411 の値は極力小さい値に設定されているため、等方性エッチングが抑制でき、デバイス特性を良好に保つことができる。

【0052】

図 4 で、第 1 高周波電力 161 に対応するマイクロ波出力 401 の出力値は、パルスオン期間 441 における第 1 期間 431 および第 2 期間 432 で、第 1 出力 411 および第 2 出力 412 として二値が連続で出力されている。パルスオン期間 441 では、第 2 高周波電力 162 に対応する高周波バイアス電力 402 のパルスオン期間 461 の前に、パルスオフ期間 460、特にオフ期間 470 を有する。このパルスオフ期間 460、特にオフ期間 470 と、第 1 出力 411 の第 1 期間 431 とが対応している。第 2 高周波電力 162 のパルスオフ期間 460、特にオフ期間 470 での第 1 高周波電力の第 1 出力 411 の出力値は、0 よりも大きく、かつ、第 2 高周波電力 162 のパルスオン期間 461 での第 1 高周波電力 161 の第 2 出力 412 の出力値よりも小さい値として設定されている。第 1 パルスにおける第 1 期間 431 の振幅値 (第 1 出力 411) は有限の値である。第 2 期間 432 の振幅 (第 2 出力 412) は、第 1 期間 431 の振幅 (第 1 出力 411) よりも

大きい。第 2 パルスは、第 2 期間 4 3 2 の間、オン期間（パルスオン期間 4 6 1）となる。

【 0 0 5 3 】

制御パラメータとして、マイクロ波出力 4 0 1 に関するパルス周波数、デューティ比、およびオン時間とオフ時間の比を有する。パルス周波数は、オン（パルスオン期間 4 4 1）とオフ（パルスオフ期間 4 4 0）の繰り返し周波数である。デューティ比は、オンとオフの繰り返しの一周期（周期時間 4 5 0）に対するオン時間（パルスオン期間 4 4 1）の比である。オン時間とオフ時間の比は、パルスオン期間 4 4 1 とパルスオフ期間 4 4 0 との比である。また、制御パラメータとして、パルスオン期間 4 4 1 における第 1 出力 4 1 1 のオン時間、および第 2 出力 4 1 2 のオン時間等を有する。

10

【 0 0 5 4 】

次に、第 1 高周波電力 1 6 1 に対応するマイクロ波出力値を三値に設定した場合のパルス出力制御例を、図 5、図 6 および図 7 に、第 2 ケース、第 3 ケースおよび第 4 ケースとして示す。

【 0 0 5 5 】

〔 第 2 ケース 〕

図 5 は、第 2 ケースにおけるマイクロ波出力 5 0 1 と高周波バイアス出力 5 0 2 とのタイミングチャートを同様に示す。なお、時刻 $t_0 \sim t_7$ の値は図 4 の例とは異なる。マイクロ波出力 5 0 1 は、周期（周期時間 5 5 0）毎に、オフ期間 5 3 0、第 1 期間 5 3 1、および第 2 期間 5 3 2 を有し、第 1 期間 5 3 1 は、さらに、期間（第 1 振幅期間）5 3 1 a、期間（第 2 振幅期間）5 3 1 b で構成される。マイクロ波出力 5 0 1 は、周期毎に、パルスオフ期間 5 4 0、パルスオン期間 5 4 1 を有し、パルスオン期間 5 4 1 は、上記第 1 期間 5 3 1、第 2 期間 5 3 2 で構成されている。パルスオン期間 5 4 1 では、期間 5 3 1 a の第 1 出力 5 1 1、期間 5 3 1 b の第 2 出力 5 1 2、および第 2 期間 5 3 2 の第 3 出力 5 1 3 の三値の出力値が連続して出力される。第 1 出力 5 1 1 は、例えば時刻 $t_1 \sim t_2$ の期間 5 3 1 a でオン状態である第 1 出力値を示す。第 2 出力 5 1 2 は、例えば時刻 $t_2 \sim t_3$ の期間 5 3 1 b でオン状態である第 2 出力値を示す。第 3 出力 5 1 3 は、例えば時刻 $t_3 \sim t_4$ の第 2 期間 5 3 2 でオン状態である第 3 出力値を示す。第 2 ケースでは、第 1 出力 5 1 1、第 2 出力 5 1 2、および第 3 出力 5 1 3 の順で出力値が大きくなる。第 1 出力 5 1 1 の出力値は、0 よりも大きく、かつ、第 2 出力 5 1 2 の出力値よりも小さい値として設定されている。第 2 出力 5 1 2 の出力値は、第 3 出力 5 1 3 の出力値よりも小さい値として設定されている。期間 5 3 1 a の第 1 振幅（第 1 出力 5 1 1）は、期間 5 3 1 b の第 2 振幅（第 2 出力 5 1 2）よりも小さい。

20

30

【 0 0 5 6 】

プラズマ処理装置 1 は、マイクロ波出力 5 0 1 の第 3 出力 5 1 3 と同期させるように、位相を変調させることで、高周波バイアス出力 5 0 2 をオンする。これにより、高周波バイアス出力 5 0 2 のパルスオン期間 5 6 1（例えば時刻 $t_3 \sim t_4$ ）での第 1 出力 5 2 1 となる。第 1 出力 5 2 1 のパルスオン期間 5 6 1 の前に、パルスオフ期間 5 6 0（例えば時刻 $t_0 \sim t_3$ ）、特にオフ期間 5 7 0 を有する。そのパルスオフ期間 5 6 0、特にオフ期間 5 7 0 に対し、マイクロ波出力 5 0 2 の第 1 出力 5 1 1 の期間 5 3 1 a、および第 2 出力 5 1 2 の期間 5 3 1 b を有する。第 1 出力 5 1 1 の出力値は、第 1 ケースと同様に、高周波バイアス出力 5 0 2 のパルスオフ期間 5 6 0、特にオフ期間 5 7 0 での等方性エッチングを極力抑制する最低の値となるように設定される。プラズマ密度は、マイクロ波出力 5 0 1 の第 1 出力 5 1 1 の期間 5 3 1 a および第 2 出力 5 1 2 の期間 5 3 1 b を通じてある程度安定してから、第 3 出力 5 1 3 および高周波バイアスのパルスオン期間 5 6 1 へ移行して直ちに安定する。これにより、第 2 ケースでも、第 1 ケースと同様に、エッチング速度分布が均一となり、等方性エッチングが抑制できる。

40

【 0 0 5 7 】

〔 第 3 ケース 〕

図 6 は、第 3 ケースにおけるタイミングチャートを同様に示す。マイクロ波出力 6 0 1

50

は、周期（周期時間 6 5 0）毎に、オフ期間 6 3 0、第 1 期間 6 3 1、および第 2 期間 6 3 2 を有し、第 1 期間 6 3 1 は、さらに、期間（第 1 振幅期間）6 3 1 a、期間（第 2 振幅期間）6 3 1 b で構成される。マイクロ波出力 6 0 1 は、周期毎に、パルスオフ期間 6 4 0、パルスオン期間 6 4 1 を有し、パルスオン期間 6 4 1 は、上記第 1 期間 6 3 1、第 2 期間 6 3 2 で構成されている。パルスオン期間 6 4 1 では、期間 6 3 1 a の第 1 出力 6 1 1、期間 6 3 1 b の第 2 出力 6 1 2、および第 2 期間 6 3 2 の第 3 出力 6 1 3 の三値の出力値が連続して出力される。第 1 出力 6 1 1 は、例えば時刻 $t_1 \sim t_2$ の期間 6 3 1 a でオン状態である第 1 出力値を示す。第 2 出力 6 1 2 は、例えば時刻 $t_2 \sim t_3$ の期間 6 3 1 b でオン状態である第 2 出力値を示す。第 3 出力 6 1 3 は、例えば時刻 $t_3 \sim t_4$ の第 2 期間 6 3 2 でオン状態である第 3 出力値を示す。第 3 ケースでは、第 2 出力 6 1 2、第 1 出力 6 1 1、および第 3 出力 6 1 3 の順で出力値が大きくなる。第 2 出力 6 1 2 の出力値は、0 よりも大きく、かつ、第 1 出力 6 1 2 の出力値よりも小さい値として設定されている。第 1 出力 6 1 1 の出力値は、第 3 出力 6 1 3 の出力値よりも小さい値として設定されている。期間 6 3 1 a の第 1 振幅（第 1 出力 6 1 1）は、期間 6 3 1 b の第 2 振幅（第 2 出力 6 1 2）よりも大きい。

10

【0058】

プラズマ処理装置 1 は、マイクロ波出力 6 0 1 の第 3 出力 6 1 3 と同期させるように、位相を変調させることで、高周波バイアス出力 6 0 2 をオンする。これにより、高周波バイアス出力 6 0 2 のパルスオン期間 6 6 1（例えば時刻 t_3 から時刻 t_4 ）の第 1 出力 6 2 1 となる。第 1 出力 6 2 1 のパルスオン期間 6 6 1 の前に、パルスオフ期間 6 6 0（例えば時刻 $t_0 \sim t_3$ ）、特にオフ期間 6 7 0 を有する。そのパルスオフ期間 6 6 0、特にオフ期間 6 7 0 に対し、マイクロ波出力 6 0 2 の第 1 出力 6 1 1 の期間 6 3 1 a、および第 2 出力 6 1 2 の期間 6 3 1 b を有する。第 2 出力 6 1 1 の出力値は、第 1 ケースと同様に、高周波バイアス出力 6 0 2 のパルスオフ期間 6 6 0、特にオフ期間 6 7 0 での等方性エッチングを極力抑制する最低の値となるように設定される。プラズマ密度は、マイクロ波出力 6 0 1 の第 1 出力 6 1 1 の期間 6 3 1 a および第 2 出力 6 1 2 の期間 6 3 1 b を通じてある程度安定してから、第 3 出力 6 1 3 および高周波バイアスのパルスオン期間 6 6 1 へ移行して直ちに安定する。これにより、第 3 ケースでも、第 2 ケースと同様の効果が得られる。

20

【0059】

30

[第 4 ケース]

図 7 は、第 4 ケースにおけるタイミングチャートを同様に示す。マイクロ波出力 7 0 1 は、周期（周期時間 7 5 0）毎に、所定の期間 7 3 3、オフ期間 7 3 0、第 1 期間 7 3 1、および第 2 期間 7 3 2 を有する。マイクロ波出力 7 0 1 は、周期毎に、パルスオフ期間 7 4 0、パルスオン期間 7 4 1（オフ期間 7 3 0 と対応する）を有し、パルスオン期間 7 4 1 は、上記所定の期間 7 3 3、第 1 期間 7 3 1、第 2 期間 7 3 2 で構成されている。パルスオン期間 7 4 1 では、所定の期間 7 3 3 の第 1 出力 7 1 1、第 1 期間 7 3 1 の第 2 出力 7 1 2、および第 2 期間 7 3 2 の第 3 出力 7 1 3 の三値の出力値を有する。所定の期間 7 3 3 の第 1 出力 7 1 1 と第 1 期間 7 3 1 の第 2 出力 7 1 2 の間にオフ期間 7 3 0 を有する。第 2 出力 7 1 2 および第 3 出力 7 1 3 は連続して出力される。第 1 出力 7 1 1 は、例えば時刻 t_0 から時刻 t_1 までの所定の期間 7 3 3 でオン状態である第 1 出力値を示す。時刻 t_1 から時刻 t_2 まではオフ期間 7 3 0 とされる。第 2 出力 7 1 2 は、例えば時刻 $t_2 \sim t_3$ の第 1 期間 7 3 1 でオン状態である第 2 出力値を示す。第 3 出力 7 1 3 は、例えば時刻 $t_3 \sim t_4$ の第 2 期間 7 3 2 でオン状態である第 3 出力値を示す。第 3 出力 7 1 3 の後には再び所定の期間 7 3 3 の第 1 出力値 7 1 1 が続いている。第 4 ケースでは、第 1 出力 7 1 1 および第 2 出力 7 1 2 は、高周波バイアス出力 7 0 2 のパルスオフ期間 7 6 0、特にオフ期間 7 7 0、7 7 1 での等方性エッチングを極力抑制する最低の値となるように設定されている。所定の期間 7 3 3 は、オフ期間 7 3 0 よりも前の期間である。第 1 期間 7 3 1 は、オフ期間 7 3 0 よりも後の期間である。所定の期間 7 3 3 の振幅値（第 1 出力 7 1 1）は、有限の値である。第 2 期間 7 3 2 の振幅（第 3 出力 7 1 3）は、所定の期

40

50

間 7 3 3 の振幅 (第 1 出力 7 1 1) よりも大きい。

【 0 0 6 0 】

プラズマ処理装置 1 は、マイクロ波出力 7 0 1 の第 3 出力 7 1 3 と同期させるように、位相を変調させることで、高周波バイアス出力 7 0 2 をオンする。これにより、高周波バイアス出力 7 0 2 のパルスオン期間 7 6 1 (例えば時刻 t_3 から時刻 t_4) の第 1 出力 7 2 1 となる。第 1 出力 7 2 1 のパルスオン期間 7 6 1 の前に、パルスオフ期間 7 6 0 (例えば時刻 $t_0 \sim t_3$) を有する。そのパルスオフ期間 7 6 0 に対し、マイクロ波出力 7 0 2 の第 1 出力 7 1 1 の所定の期間 7 3 3、オフ期間 7 3 0、および第 2 出力 7 1 2 の第 1 期間 7 3 1 を有する。プラズマ密度は、マイクロ波出力 7 0 1 の第 1 出力 7 1 1 の所定の期間 7 3 3、オフ期間 7 3 0、および第 2 出力 7 1 2 の第 1 期間 7 3 1 を通じてある程度安定してから、第 3 出力 7 1 3 および高周波バイアスのパルスオン期間 7 6 1 へ移行して直ちに安定する。これにより、第 4 ケースでも、同様の効果が得られる。これらの第 2 ケース～第 4 ケースを用いても、第 1 ケースと同様に、エッチング速度分布の偏りと C D の差異とを同時に避ける効果が得られた。

10

【 0 0 6 1 】

図 8 および図 9 には、実施の形態に対する比較例として、従来技術のプラズマ処理装置および方法における、パルス変調されたマイクロ波出力および高周波バイアス出力の関係を示す。

【 0 0 6 2 】

[第 5 ケース]

20

図 8 は、比較例における第 5 ケースでのタイミングチャートを同様に示す。マイクロ波出力 8 0 1 は、周期 (周期時間 8 5 0) 毎に、パルスオフ期間 8 4 0、パルスオン期間 8 4 1 を有し、パルスオン期間 8 4 1 での第 1 出力 8 1 1 を有する。第 1 出力 8 1 1 は、例えば時刻 $t_1 \sim t_2$ のパルスオン期間 8 4 1 でオン状態にされた 1 つの出力値を示す。比較例のプラズマ処理装置は、マイクロ波出力 8 0 1 の第 1 出力 8 1 1 と同期させるように、高周波バイアス出力 8 0 2 をオンする。これにより、高周波バイアス出力 8 0 2 のパルスオン期間 8 6 1 (例えば時刻 t_1 から時刻 t_2) での第 1 出力 8 2 1 となる。

【 0 0 6 3 】

[第 6 ケース]

30

図 9 は、比較例における第 6 ケースでのタイミングチャートを示す。マイクロ波出力 9 0 1 は、周期 (周期時間 9 5 0) 毎に、パルスオフ期間 9 4 0、パルスオン期間 9 4 1 を有し、パルスオン期間 9 4 1 での第 1 出力 9 1 1 を有する。第 1 出力 9 1 1 は、例えば時刻 $t_1 \sim t_3$ のパルスオン期間 9 4 1 でオン状態にされた 1 つの出力値を示す。比較例のプラズマ処理装置は、位相変調を用いて、マイクロ波出力 9 0 1 のパルスオン期間 9 4 1 の第 1 出力 9 1 1 のうち、後半の一部の期間 (例えば時刻 t_2 から時刻 t_3) と同期させるように、言い換えると例えば時刻 t_1 のオンのタイミングよりも遅れた時刻 t_2 のタイミングで、高周波バイアス出力 9 0 2 をオンする。これにより、高周波バイアス出力 9 0 2 のパルスオン期間 9 6 1 (例えば時刻 $t_2 \sim t_3$) での第 1 出力 9 2 1 となる。パルスオン期間 9 6 1 の前にはパルスオフ期間 9 6 0 を有する。

【 0 0 6 4 】

40

この第 6 ケースでは、マイクロ波出力 9 0 1 の第 1 出力 9 1 1 のパルスオン期間 9 4 1 よりも、高周波バイアス出力 9 0 2 の第 1 出力 9 2 1 のパルスオン期間 9 6 1 の方が短い。マイクロ波の第 1 出力 9 1 1 のパルスオン期間 9 4 1 に対し、高周波バイアスのオフ期間 9 7 0 を有する。すなわち、このオフ期間 9 7 0 として、前述のマイクロ波オン、かつ高周波バイアスオフの期間が生じている。前述のように、このオフ期間 9 7 0 でのマイクロ波の出力値と、パルスオン期間 9 6 1 でのマイクロ波の出力値とが第 1 出力値 9 1 1 として同じである。そのため、このオフ期間 9 7 0 では、エッチングの反応は、ラジカルエッチングが主体となり、等方性エッチングが進む。等方性エッチングによって、C D に差異が生じてしまう。

【 0 0 6 5 】

50

〔エッチング特性〕

図10には、上記各パルス出力制御のケースに対応するマイクロ波出力値パターンにおける、エッチング特性の測定値を示す。各ケースとして、第1ケース（図4）、第2ケース（図5）、第3ケース（図6）、および第4ケース（図7）と、比較例の第5ケース（図8）および第6ケース（図9）とを示す。ウエハ122がポリシリコンである場合のエッチング特性として、エッチング速度[nm/min]と、均一性[%]とを示す。均一性[%]は、0を基準とした正負の率であり、値が0に近いほど高い。第1ケースから第6ケースまで順に、エッチング速度は、{80.1, 75.6, 78.2, 76.5, 83.0, 85.7}となった。均一性は、{1.9, 2.1, 2.4, 2.2, 5.4, 3.5}となった。このように、実施の形態における第1ケースから第4ケースの各ケースでは、比較例の第5ケースおよび第6ケースに比べ、均一性が良好になる結果が得られた。

10

【0066】

〔効果等〕

上述したように、本発明の実施の形態のプラズマ処理装置は、試料を載置する試料台（試料載置用電極111）を含み、試料がプラズマ処理される処理室104と、処理室104内にプラズマを生成するための第1高周波電力161（マイクロ波）を供給する第1高周波電源（電磁波発生用電源109）と、試料台に第2高周波電力162（高周波バイアス電力）を供給する第2高周波電源（高周波バイアス電源114）と、第1高周波電力161を時間変調するための第1パルス151を第1高周波電源に送信するとともに、第2高周波電力162を時間変調するための第2パルス152を第2高周波電源に送信するパルス発生ユニット121と、パルス発生ユニット121等を制御する制御部120とを備える。そして、図4等で示したように、第1高周波電力161の出力値は、パルスオン期間での二値以上の出力値となる。第1高周波電力161のパルスオン期間では、第2高周波電力162のパルスオン期間の前に第2高周波電力162のオフ期間を少なくとも1つ有する。第2高周波電力162のオフ期間での第1高周波電力161の出力値（例えば二値のうちの第1出力値）は、0よりも大きく、かつ、第2高周波電力162のパルスオン期間での第1高周波電力161の出力値（例えば二値のうちの第2出力値）よりも小さい。さらに、プラズマ処理装置1は、図3で示したように、第1高周波電力161のパルスオン期間の二値以上の出力値をモニタするために、少なくとも2つの検波器を有する。

20

【0067】

上述した通り、本発明の実施の形態のプラズマ処理装置1によれば、マイクロ波出力値をパルスオン期間での二値以上の出力値とすることで、エッチング速度分布が均一となり、かつ、等方性エッチングが抑制可能となる。これにより、プロセス性能の高精度な制御が可能となる。プラズマ処理装置1の構成によれば、最適なプラズマ状態と高周波バイアスとの組み合わせを制御することが可能となり、高精度なプロセス制御ができる。

30

【0068】

上述した実施の形態では、マイクロ波ECRプラズマの生成方式を一例として説明したが、容量結合型プラズマや誘導結合型プラズマ等の他のプラズマの生成方式に対応するプラズマ処理装置等においても、本発明を同様に適用可能であり、同様の効果が得られる。また、上述した実施の形態では、マイクロ波出力変調用パルスの繰り返し周波数と高周波バイアス変調用パルスの繰り返し周波数とが等しい場合で説明したが、それらを異なる周波数とした場合でも、同様の効果が得られる。さらに、上述した実施の形態では、エッチング装置およびエッチング処理の場合について説明したが、パルス変調方式を用いる装置であれば、エッチング処理以外のプラズマ処理にも、本発明を同様に適用可能である。

40

【0069】

以上、本発明を実施の形態に基づいて具体的に説明したが、本発明は前述の実施の形態に限定されず、その要旨を逸脱しない範囲で種々変更可能である。

【符号の説明】

【0070】

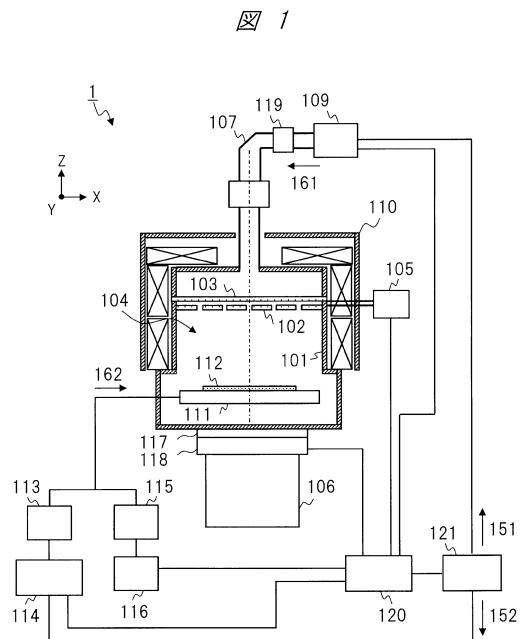
101...真空容器、102...シャワープレート、103...誘電体窓、104...処理室、

50

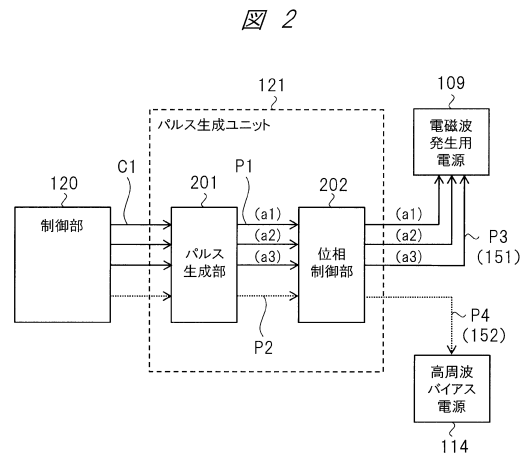
105 ... ガス供給装置、106 ... 真空排気装置、107 ... 導波管、109 ... 電磁波発生用電源、110 ... 磁場生成コイル、111 ... 試料載置用電極、112 ... ウエハ、113 ... マッチング回路、114 ... 高周波バイアス電源、115 ... 高周波フィルタ、116 ... 直流電源、117 ... 排気用開閉バルブ、118 ... 排気速度可変バルブ、119 ... 整合器、120 ... 制御部、121 ... パルス発生ユニット、201 ... パルス生成部、202 ... 位相制御部、301 ... 調整器、302, 303, 304 ... 検波器、401 ... マイクロ波出力、402 ... 高周波バイアス出力、403 ... プラズマ密度、411 ... 第1出力、412 ... 第2出力、421 ... 第1出力、430 ... オフ期間、431 ... 第1期間、432 ... 第2期間、440, 460 ... パルスオフ期間、441, 461 ... パルスオン期間、450 ... 周期時間、470 ... オフ期間。

10

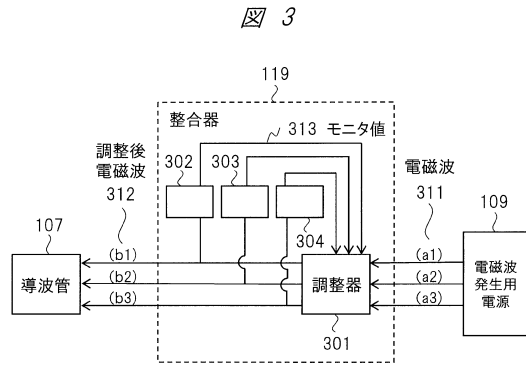
【図1】



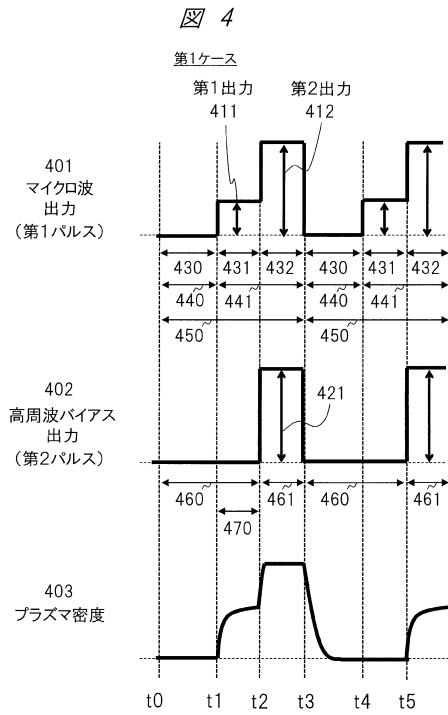
【図2】



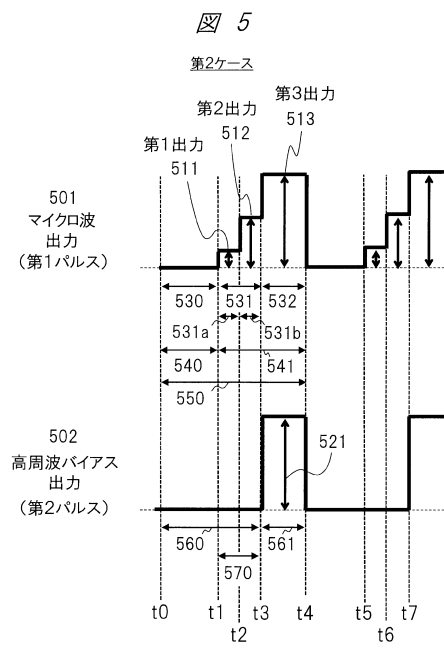
【図 3】



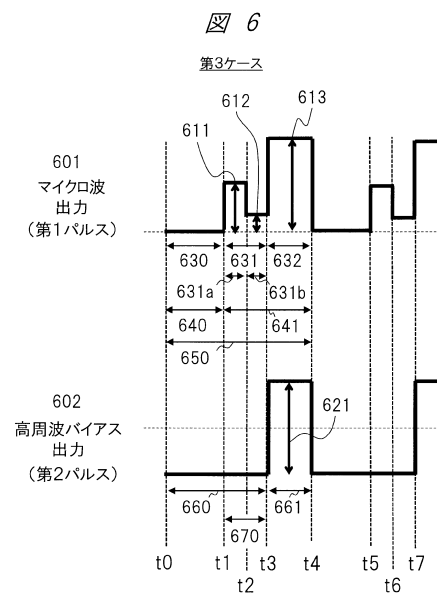
【図 4】



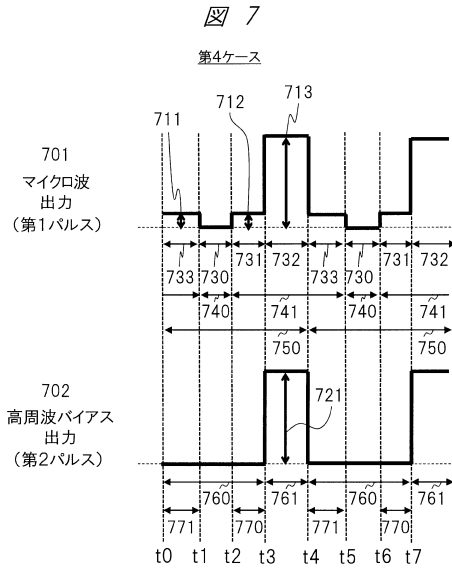
【図 5】



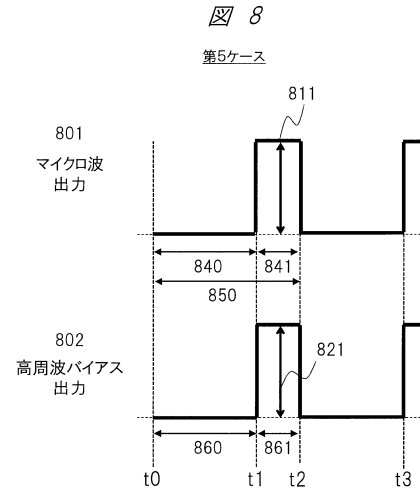
【図 6】



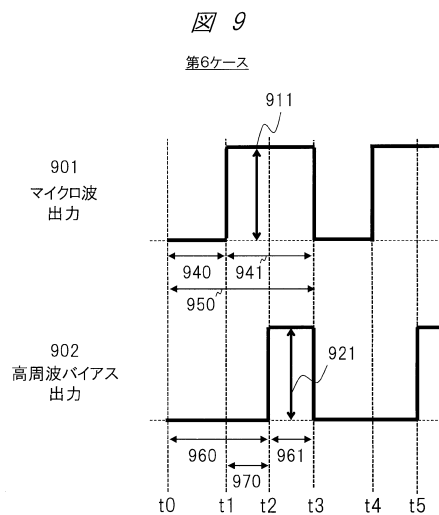
【図 7】



【図 8】



【図 9】



【図 10】

図 10

マイクロ波 出力値 パターン	Poly-Si エッチング特性	
	エッチング速度 [nm/min]	均一性 ±[%]
第1ケース	80.1	1.9
第2ケース	75.6	2.1
第3ケース	78.2	2.4
第4ケース	76.5	2.2
第5ケース	83.0	5.4
第6ケース	85.7	3.5

フロントページの続き

審査官 宇多川 勉

(56)参考文献 特表2013-535074(JP,A)
国際公開第2015/056509(WO,A1)
国際公開第99/011103(WO,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01L 21/3065
H05H 1/46